МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.01 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-235-242

Формирование качества поверхностного слоя при абразивной обработке полимеркомпозитных материалов



М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, А. В. Верченко, В. М. Троицкий
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Представлены результаты исследований процесса абразивной обработки деталей из полимеркомпозитных материалов. Описаны особенности обработки полимеркомпозитов, технология получения заготовки гидроабразивной резкой. Исследованы этапы подготовки детали из полимеркомпозитного материала к операции «склеивание».
Материалы и методы. Учтены зависимости для определения шероховатости поверхности при гидроабразивной резке полимеркомпозитного материала. Выполнены исследования по достижению необходимой шероховатости поверхности при склеивании заготовок. Приведена зависимость, описывающая шероховатость, которой необходимо достичь для обеспечения надежного клеевого соединения.
Результаты исследования. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса гидроабразивной резки. Описана методика их проведения, применяемый инструмент и оснастка. Сопоставлены результаты теоретических и экспериментальных исследований. Установлена их высокая сходимость. Показаны итоги экспериментальных исследований по подготовке деталей из полимеркомпозитных материалов к склеиванию. Подобраны абразивный инструмент и режимы обработки.
Обсуждения и заключения. Предложена методика проектирования технологического процесса абразивной обработки заготовок из полимеркомпозитных материалов.

Ключевые слова: обработка полимеркомпозитных материалов, гидроабразивная резка, обработка лепестковыми кругами, шероховатость поверхности.

Для цитирования: Формирование качества поверхностного слоя при абразивной обработке полимеркомпозитных материалов / М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, А. В. Верченко, В. М. Троицкий // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 235−242. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-235-242



Formation of surface layer quality under abrasive treatment of polymer-composite materials

M. A. Tamarkin, Eh. Eh. Tishchenko, A. V. Verchenko, V. M. Troitskii
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The study results of the abrasive processing of parts made of polymer-composite materials are presented. The features of processing polymer composites and the technology of preforming through waterjet cutting are described. The stages of preparation of a part made of polymer-composite material for the “glueing” operation are investigated.
Materials and Methods. Dependences for determining the surface roughness under waterjet cutting of polymer-composite material are considered. Research is carried out to achieve the required surface roughness under adhesive bonding of workpieces. The dependence is given that describes the roughness that is required for a reliable adhesive bond.
Results. The theoretical and experimental studies of the waterjet cutting process are resulted. Their implementation technique, the tool and equipment used are described. The results of theoretical and experimental studies are compared. Their high convergence is established. The results of experimental studies on the preparation of parts made of polymer-composite materials for glueing are shown. The abrasive tools and processing modes are selected.

Discussions and Conclusions. The process design procedure of abrasive treatment of workpieces from polymer-composite materials is proposed.

Keywords: treatment of polymer composites, waterjet cutting, treatment by petal wheels, surface roughness.

For citation: M.A. Tamarkin, E.E. Tishchenko, A.V. Verchenko, et al. Formation of surface layer quality under abrasive treatment of polymer-composite materials. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 235−242. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-235-242

Введение. Повышение производительности труда на современном машиностроительном производстве возможно за счет применения новых технологий и материалов. Для изготовления деталей машин все шире используют полимеркомпозитные материалы (ПКМ). Это композиция двух и более материалов — основы и связующего. Изделия из полимеркомпозитов по сравнению с металлическими имеют лучшие физико-механические свойства и при этом, как правило, гораздо меньше весят. Анизотропная структура полимеркомпозитного материала позволяет распределять полезную нагрузку по всей конструкции изделия, что повышает его эксплуатационные свойства. ПКМ формируется определенным образом. Слои основы укладываются в направлениях, взаимно противоположных друг другу. А связующее выполняет роль наполнителя, т. е. обеспечивает неподвижность и заполнение пространства между слоями основы. На поверхности полимеркомпозита формируется особый слой, образованный отвердевшим связующим. Этот слой может не совпадать с идеальной формой поверхности. Его адгезионные свойства обеспечивают:

— вещества, которые находятся на поверхности детали и содержат отвердитель,

— продукты химической реакции, происходящей во время отверждения.

Антиадгезионный слой полимеркомпозита подлежит удалению механической обработкой. При этом обеспечивается оптимальная шероховатость поверхности обработанной детали. Механическая обработка ПКМ имеет ряд особенностей:

— образуются расслоения,

— волокна вблизи места обработки разлохмачиваются,

— выделяется большое количество тепла при резании,

— образуются прижоги,

— материал разрушается.

При этом не всегда можно применять смазывающие охлаждающие жидкости, так как их воздействие ведет к расслаиванию, набуханию, и ПКМ теряет необходимые физико-механические свойства. Это связано с тем, что полимеркомпозиты обильно поглощают влагу. Применение жидкости при обработке ПКМ требует дальнейшего изучения.

На большинстве предприятий, где производятся детали из полимеркомпозитов, технологический процесс состоит из раскроя листа и дальнейшей механической обработки заготовки. Часто полимеромпозитные детали склеивают, что требует тщательной подготовки поверхностного слоя. В рамках данной работы исследовано формирование качества поверхности при гидроабразивной резке ПКМ, а также при подготовке поверхности к дальнейшему склеиванию.

Материалы и методы. В современном машиностроении получает все большее распространение раскрой материалов методом гидроабразивной резки. Его преимущества: большое разнообразие обрабатываемых материалов, высокая производительность, хорошее качество поверхности реза и возможность получать фасонные поверхности. При использовании этого метода не возникают значительные внутренние напряжения в связи с низкотемпературным характером процесса.

Кроме того, для гидроабразивной резки характерен малый припуск и высокая точность реза. Этим она отличается от лезвийной обработки и обработки связанным абразивом. Процесс разрезания материала гидроабразивной струей достаточно сложен, мало изучен, на его результат влияют многие технологические факторы: скорость истечения струи из сопла, скорость передвижения сопла вдоль детали, характеристики абразивного порошка, расстояния от сопла до обрабатываемой поверхности, а также физико-механические свойства обрабатываемых полимеркомпозиционных материалов. Возникают некоторые сложности при проектировании технологии резки. Они связаны прежде всего с выбором оптимальных режимов резания: необходимо обеспечить заданное качество поверхности детали при наименьших затратах на обработку. Применение гидроабразивной резки для обработки ПКМ требует также исследования влияния воды на состояние поверхности реза. Предварительные исследования позволили установить силу энергии сверхзвуковой струи воды с абразивом. Она настолько велика, что при ее взаимодействии с обрабатываемой поверхностью разрушение по интенсивности сравнимо с повреждением от твердого абразивного инструмента.

При резке вода не отклоняется от траекторий движения, воздействие на материал заготовки минимальное, т. е. вода не поглощается [1–4].

Как известно, при глубоком резании материалов (в том числе полимеркомпозитных) в зоне контакта абразивной струи и разрезаемого материала возникают две четко отслеживаемые зоны:

— с низкой шероховатостью поверхности (зона гладкого реза),

— с более высокой шероховатостью (зона волнистого реза) [1, 2].

Их появление обусловлено тем, что при контакте струи с нижней частью реза растет угол атаки внедренных частиц. Значительное их число не участвует в полезном соударении, отражается от материала. При этом новые взаимодействующие частицы встречают препятствие, отражаются и вызывают блокировку частиц, поступающих в зону обработки. В результате появляется зона волнистого реза с высокой шероховатостью поверхности. В верхней части реза соударению частиц ничто не препятствует, поэтому образуется поверхность более гладкая, с меньшей шероховатостью. В современных условиях при проектировании технологических процессов гидроабразивной резки сложно определить не только величины шероховатости поверхности различных зон реза, но и размеры самих зон гладкого и волнистого реза. Прогноз получения необходимой шероховатости на стадии проектирования технологии позволит определять целесообразность чистовой обработки и требуемые в этом случае величины припусков.

Теоретические исследования формирования профиля шероховатости различных зон реза ПКМ выявили закономерности, описывающие процесс взаимодействия абразивной частицы с поверхностью обрабатываемой детали. Установлено, что шероховатость поверхности реза зависит от технологических параметров обработки. Разрезаемый слой материала условно разделен на две зоны резов: волнистого и гладкого. Описан механизм формирования этих зон. Определен диапазон глубин внедрения частиц [1–2]:

$$h_{\max} = DK_L \sin\alpha \sqrt{\frac{2P_{дин}\rho_ч}{3c\rho_{см}k_s\sigma_s}}\,, \tag{1}$$

где $\rho_ч$ — плотность материала частиц; k_s — коэффициент, который учитывает влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта; K — объемная концентрация частиц в рабочей жидкости; $P_{дин}$ — динамическое давление смеси; $\rho_{см}$ — плотность рабочей смеси жидкости и частиц; σ_s — предел текучести материала детали; D — диаметр частицы; K_L — коэффициент потерь энергии на преодоление расстояния от сопла до поверхности детали; c — коэффициент несущей способности контактной поверхности; α — угол соударения абразивной частицы с обрабатываемой поверхностью.

Поток абразивных частиц опишем как поток событий, соответствующий распределению Пуассона: частицы среды выполняют микрорезание в фиксированном интервале времени, который не зависит ни от начала его отсчета, ни от возможных реализаций предыдущих или последующих аналогичных актов. Параметр λ в законе Пуассона представляет собой интенсивность потока событий. Примем для гидроабразивной резки, что λ — это число возможных взаимодействий в единицу времени на площади квадрата упаковки абразивных частиц. Тогда через каждую сторону квадрата упаковки $2R$ пройдет $\sqrt{\lambda}$ частиц, а через единичную длину — $\frac{L_{ед}}{2R}$ частиц. С учетом этого предложена формула, которая позволяет определить среднее арифметическое отклонения профиля установившейся шероховатости поверхности при гидроабразивной резке ПКМ [1, 2]:

$$Ra = 13{,}01K_\alpha^{Ra} \cdot R\sqrt{K_L \cdot \sin\alpha \cdot \sqrt{\frac{P_{дин} \cdot \rho_ч}{\lambda \cdot c \cdot \rho_{см} \cdot k_S \cdot \sigma_S}}}\,, \tag{2}$$

где K_α^{Ra} — коэффициент, учитывающий угол соударения абразивных частиц с поверхностью детали; R — средний радиус частиц.

Число полезных взаимодействий λ функционально зависит от величины подачи, давления абразивной струи, глубины измерения шероховатости $\lambda = f(S, Q, h)$. Теоретическое описание величины λ затруднено. Поэтому λ определена на основании экспериментальных исследований, которые позволили предложить комплекс регрессионных зависимостей.

Эксперименты проходили на базе ростовского вертолетного производственного комплекса ПАО «Роствертол». Использовалась 5-координатная установка для гидроабразивной резки *Flow*. В качестве абразивной среды применили гранатовый песок. Образцы изготавливали из стеклопластика ВПС-7, армированного титановой фольгой (маркировка ОТ4-0-0,1×220). Этот стеклопластик на «Роствертоле» используют для натурных деталей вертолета Ми-28.

Шероховатость поверхности измерялась с помощью цифрового профилометра *Surtronic* 25 фирмы *Taylor Hobson*. Воздействие воды на резание ПКМ исследовалось на дифференциально сканирующем

калориметре DSC 200 F3 *Maia* фирмы *NETZSCH*. Результаты обрабатывались методом математической статистики в программе *MathCad*.

Результаты исследования. Шероховатость поверхности реза повышается с увеличением подачи сопла. Одновременно возрастает относительная высота зоны волнистого реза. Определены интервалы значений шероховатости поверхности и режимы обработки, необходимые для гидроабразивной резки ПКМ с заданными свойствами. При исследовании влияния подачи сопла скорость его движения изменялась в диапазоне от 5 до 480 мм/мин. Для материала характерны слоистая структура и анизотропия. В этой связи шероховатость поверхности реза измерялась в двух направлениях: перпендикулярно подаче и вдоль нее.

Анализ результатов экспериментальных исследований процесса гидроабразивной резки позволяет получить модели формирования поверхности реза:

— однофакторную, описывающую изменение шероховатости поперек сечения реза;

— двухфакторную — для расчета изменения шероховатости вдоль сечения реза и варьирования глубины измерения шероховатости (4) на основании регрессионного анализа:

$$Ra = 3,538\cdot10^{-6} + 4,721\cdot10^{-6}\cdot S, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Ra = {} & 2,706\cdot10^{-13}\cdot S\cdot h - 3,157\cdot10^{-10}\cdot h + 1,886\cdot10^{-8}\cdot h^2 - \\ & -3,062\cdot10^{-7}\cdot h - 1,301\cdot10^{-10}\cdot S\cdot h + 1,469\cdot10^{-12}\cdot S^2\cdot h + \\ & +4,288\cdot10^{-6} + 1,324\cdot10^{-8}\cdot S - 5,142\cdot10^{-11}\cdot S^2 + 7,308\cdot10^{-14}\cdot S^3. \end{aligned} \quad (4)$$

Изучено влияние воды на термофизические свойства полимеркомпозита при гидроабразивной резке. Исследование проводилось методом дифференциально сканирующей калориметрии. В результате установлена возможность использования данного метода обработки для резки деталей из ПКМ.

Шероховатость поверхности реза определялась по теоретической модели (2) и сравнивалась с результатами, полученными экспериментально. Установлено, что расхождение не превышает 15 %. Это свидетельствует о том, что полученный комплекс теоретических моделей может быть использован при технологическом проектировании обработки деталей из ПКМ.

На многих машиностроительных предприятиях для подготовки поверхности к склеиванию применяют ручную обработку шлифовальной шкуркой (ГОСТ 13344−79, ГОСТ 5009−82 и ГОСТ 10054−82). Как правило, образец шлифуется до снятия глянца, что позволяет удалить с детали тонкий слой связующего и не повредить волокна. При этом трудоемкость ручной операции очень высокая, и затраты на нее велики. Шлифовальная шкурка быстро изнашивается, и ее приходится менять. Кроме того, качество зашкуривания напрямую зависит от квалификации сотрудника, его умения создать определенную силу прижима и удалить поверхностный слой без разрушения волокон композита [4–8].

Необходимо снизить трудоемкость рассматриваемой операции, исключить ручной труд, сохранив качество обработки. В этой связи предложены два подхода к решению проблемы. Первый базируется на всестороннем исследовании процессов обеспечения шероховатости, заданной для деталей из ПКМ. Предполагается, что полученная шероховатость обеспечит прочность склеивания и при этом не придется ограничиваться минимально возможной шероховатостью. Можно подобрать инструмент для механизации обработки деталей из ПКМ. Такие исследования проводились на «Роствертоле» с натурными деталями из полимеркомпозитных материалов. Рассматривалась обработка шлифовальными эластичными инструментами, которая позволяет механизировать процесс. Зерна перемещаются в направлении нормальной составляющей усилия резания, снижая напряженность теплового потока и обеспечивая повышение стойкости инструмента [7]. Особенность этого процесса — отсутствие микротрещин, характерных для обработки жестким шлифовальным инструментом [8]. Кроме того, отсутствие необходимой жесткости характерно для многих деталей из ПКМ: обшивок, оболочек, колпаков и т. п. Для их обработки гораздо целесообразнее применять эластичный шлифовальный инструмент. За счет своих упругих свойств такой инструмент (в отличие от инструмента на жесткой основе) гасит вибрации и колебания, а также амортизирует при обработке [4–8]. Гигроскопичность полимерных композиционных материалов затрудняет или не допускает использование охлаждающей жидкости при обработке. Для таких случаев хорошо подходит гибкий абразивный инструмент. Он обеспечивает высококачественное шлифование без охлаждения и без смачивания поверхности обрабатываемой детали.

Теоретически исследовано формирование качества поверхности детали из ПКМ, предназначенной для дальнейшего склеивания.

При расчете параметров шероховатости поверхности использована методика, разработанная профессором А. В. Королевым [9]. Ее применяют для описания формирования профиля шероховатости при обработке жестко связанным абразивом:

$$Ra = 0,9\sqrt{\frac{t_c \cdot v_S \cdot l_{\phi}^3 \cdot L_{ed}}{60 \cdot v_K \cdot L_K}}, \quad (5)$$

где t_c — толщина слоя материала, снимаемого за один проход; v_s — скорость подачи; $l_ф$ — фактическое расстояние между контактными зернами; $L_{ед}$ — ширина обрабатываемого участка; $v_к$ — скорость круга; $L_к$ — суммарная протяженность лепестков.

Для проверки адекватности полученной зависимости провели комплекс экспериментов по подготовке полимеркомпозитных деталей к дальнейшему склеиванию. Образцы из стеклопластика ВПС-7, имеющие значительную площадь (80 × 200 мм), обрабатывались гибкими лепестковыми абразивными кругами фирмы *Klingspor* (модель MM 630 с рассеченными ламелями, рис. 1).

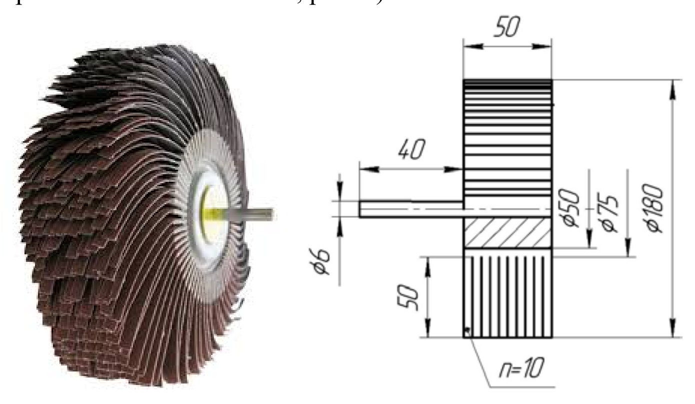


Рис. 1. Схема абразивного лепесткового круга фирмы *Klingspor* (модель MM 630): диаметр — 180 мм, ширина — 50 мм, абразивный материал — электрокорунд, связующий материал — смола синтетическая

Лепестки шлифовальной шкурки закреплены на оправке диаметром 6 мм и рассечены в радиальном направлении на десять равных сегментов, которые, в свою очередь, завернуты в одном направлении. Длина такого сегмента 50 мм. Инструмент имеет высокую эластичность и может изготавливаться из абразивных материалов различной зернистости.

Стабильность режимов обработки достигается постоянством центробежных и упругих сил, создаваемых лепестками шлифовальной шкурки. На качество поверхностного слоя обработанных деталей существенно влияет скорость подачи и удельное давление лепестков. Важное значение имеет также динамический радиус круга $r_Д$ — расстояние от его оси до поверхности соприкосновения лепестка с обрабатываемой деталью [7, 9].

Выбранный таким образом шлифовальный круг закреплялся в шпинделе вертикально-фрезерного станка. Скорость вращения круга составляла 450–1400 об/мин, подача — 100–800 мм/мин. Динамический радиус выбирали из размеров: 55 мм, 60 мм, 65 мм, что создает различную площадь контакта лепестков с поверхностью обрабатываемой детали. Образцы закреплялись на станке в специальном устройстве.

Эксперименты доказали возможность получения равномерной матовой поверхности, лишенной глянца, при использовании гибких лепестковых кругов. После обработки целостность волокон не была нарушена. Шероховатость поверхности образцов замерялась на профилометре *Tailor Hobson*. Для вышеописанных режимов получено среднее арифметическое значение шероховатости Ra = 1,22 мкм (рис. 2).

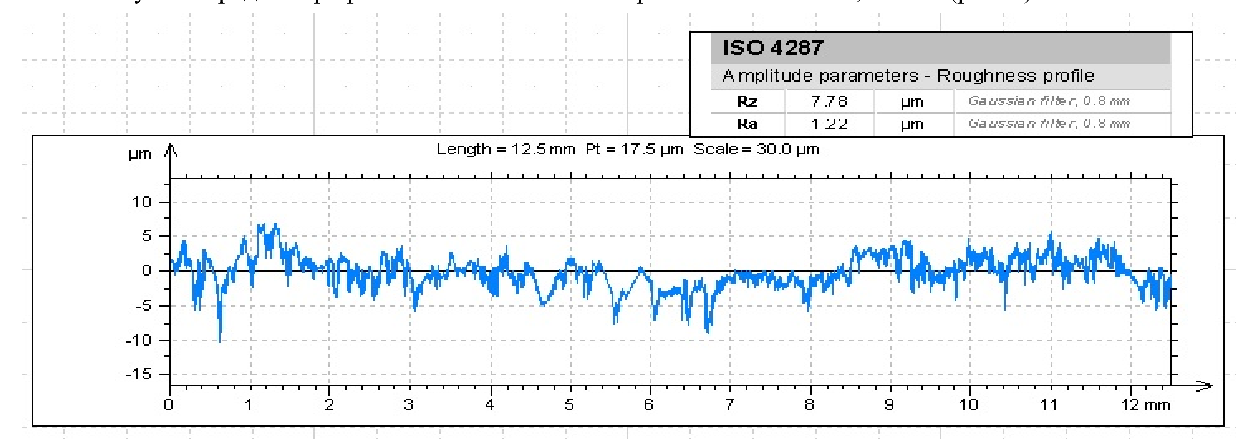


Рис. 2. Профилограмма поверхности образца, обработанного лепестковым кругом: скорость вращения — 1400 об/мин, подача — 315 мм/мин, динамический радиус круга ($r_Д$) — 55 мм

В результате экспериментов по обработке образцов из ПКМ гибкими лепестковыми кругами получена равномерная матовая поверхность, лишенная глянца. При этом целостность волокон не нарушена. Обработанную поверхность осмотрели и измерили шероховатость на профилометре *Tailor Hobson*. При выбранных режимах обработки получена шероховатость Ra = 1,22 мкм, которая показана на профилограмме (рис. 2).

Статистическая обработка данных экспериментальных исследований показала их высокую сходимость с результатами теоретических расчетов.

Обсуждение и заключение. Рассмотрены вопросы проектирования и оптимизации технологических процессов гидроабразивной резки ПКМ и подготовки их поверхности к склеиванию. Разработана методика, учитывающая заданные шероховатости поверхности реза и склеиваемой поверхности и обеспечивающая минимальную себестоимость изделия [1, 2, 10–11][1]. Шероховатость поверхности реза рассчитана по формуле (2). С учетом начальных параметров обработки ($P_{дин}$, R, $\rho_ч$, h, L, S, Q) рассчитывается число полезных соударений λ. Затем определяется значение шероховатости Ra. Отсеиваются варианты техпроцессов, при которых не выполняется условие $Ra \leq Ra_{зад}$, и рассчитывается себестоимость реза. Оптимальной считается комбинация параметров обработки, при которой себестоимость реза будет минимальной.

Проектирование операции подготовки детали из ПКМ к склеиванию начинается с технологической оценки конструкции детали и клеевого соединения, в котором участвует эта деталь. Для каждого вида адгезива и выполняемого клеевого соединения разработчик должен указать необходимый класс шероховатости поверхности, подлежащей склеиванию. С учетом этого технолог выбирает зернистость шлифовального инструмента и режимы обработки. Полученная поверхность детали из ПКМ должна быть однородной и равномерно обработанной по всей поверхности склеивания. Качество обработки описывает среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости Ra. Замеры данного параметра проводятся при помощи профилометра щупового типа. При этом корректное назначение режимов обработки и правильный выбор инструмента позволяют обеспечивать необходимую величину шероховатости поверхности.

Деталь, поверхность которой готовят к склеиванию, должна быть очищена и свободна от остатков материалов опрессовки (разделительных материалов, материалов вакуумных мешков, герметиков и т. п.). Удаляются технологические припуски, которые не нужны на последующих операциях. Зашкуренная поверхность визуально проверяется на наличие наплывов, шагреней и других дефектов, подлежащих удалению.

Определяется шероховатость, которая обеспечит требуемую прочность клеевого соединения. В зависимости от нее выбирается зернистость абразивного круга. Для обработки тонкостенных изделий с недостаточной жесткостью при подготовке их поверхностей под склеивание рекомендуется использовать шлифовальные круги зернистостью 240, 220, 180 и 150 по FERA (Federation of the European Producers of Abrasives — Ассоциация европейских производителей абразивной продукции).

Для обработки деталей из ПКМ при наличии довольно толстого поверхностного эпоксидного слоя (0,01 мм и более) подойдет зернистость по FERA 40, 80, 100, 120. Для сошкуривания наплывов, шагреней, перепадов и т. п. с одновременной подготовкой поверхности к склеиванию рекомендуется использовать шлифовальные лепестковые круги зернистостью по FERA 80, 100, 120. Производительность такого процесса возрастает (если сравнивать с применением кругов меньшей зернистости).

Выбираются режимы обработки. Исходя из площади поверхности, подлежащей зашкуриванию, рассчитывается количество проходов инструмента. Отдельно следует сказать о деталях сложной формы с поверхностями, расположенными под углом, имеющими радиусы скругления и криволинейные участки элементов конструкций. Их обрабатывают в первую очередь, а уже затем переходят к плоским участкам. Детали с криволинейными поверхностями можно механически обрабатывать на высокотехнологичных станках и установках с программным управлением. В этом случае инструмент движется в соответствии с управляющей программой, а его траектория повторяет теоретический контур детали.

В таблице 1 приведены рекомендации по выбору режимов обработки для деталей из стеклопластика, которые в дальнейшем будут склеиваться. Оборудование — лепестковые круги фирмы *Klingspor*. Параметры

[1] Подашев Д. В. Оптимизация финишной обработки деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов эластичным абразивным инструментом : дис. … канд. тех. наук. Иркутск, 2014. 169 с.

процесса шлифования, обеспечивающие требуемую шероховатость: частота вращения круга n (об/мин), подача S (мм/мин) и $r_Д$ (мм).

Таблица 1

Рекомендации по выбору режимов резания при окончательной абразивной обработке деталей из ПКМ

Необходимая шероховатость	Зернистость материала		*Rc**, мм	*S*, мм/мин	*n*, об/мин
	лепесткового круга, рекомендованная по FERA	абразива по ГОСТ 3647–80			
4,5–5,0	P40	40	55	200–350	1400–1600
4,2–4,5	P80	20	55	200–350	1400–1600
3,7–4,2	P100	16	55	200–350	1400–1600
3,0–3,7	P120	12	50	200–400	1100–1400
2,6–3,0	P150	10	50	200–400	1100–1400
1,6–2,5	P180	8	50	200–400	1100–1400
1,2–1,6	P220	6	48	200–350	1100–1200
1,0–1,2	P240	5; M63	48	350–500	1100–1200
0,6–1,0	P320	5; M50	46	350–500	1100–1200
**Rc* указан для лепестковых кругов модели, рассматриваемых в данном исследовании.					

После окончания обработки поверхность детали очищается от продуктов зашкуривания с помощью чистой хлопчатобумажной салфетки или щетки-сметки с мягкой щетиной. При этом стеклопластиковая пыль не должна подниматься в воздух.

Визуальный контроль выявит необработанные участки (глянец на поверхности), а также оголения и разрушения волокон полимеркомпозита.

Библиографический список

1. Тамаркин, М. А. Повышение качества гидроабразивной резки деталей из авиационных материалов / М. А. Тамаркин, А. В. Верченко, А. А. Кишко // Вестник РГАТУ им. П. А. Соловьева. — 2017. — № 2 (41). — С. 88–96.

2. Верченко, А. В. Исследование шероховатости поверхности реза при гидроабразивной резке / А. В. Верченко, М. А. Тамаркин, А. А. Кишко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2017. — Т. 17, № 2. — С. 116–130. DOI: https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-2-116-130

3. Щеголев, В. А. Эластичные абразивные и алмазные инструменты (теория, конструкция, применение) / В. А. Щеголев, М. Е. Уланова. — Ленинград : Машиностроение, 1977. — 184 с.

4. Новоселов, Ю. К. Динамика формирования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. — Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2012. — 304 с.

5. Гдалевич, А. И. Финишная обработка лепестковыми кругами / А. И. Гдалевич. — Москва : Машиностроение, 1990. — 112 с.

6. Козулько, Н. В. Механизация абразивной обработки деталей из полимерных композитных материалов под операцию «склеивание» / Н. В. Козулько // Вестник Донского государственного технического университета. — 2018. — Т. 18, № 2. — С. 179–189. DOI: https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-2-179-189

7. Козулько, Н. В. Исследование процесса окончательной абразивной обработки деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) / Н. В. Козулько, К. В. Семиниченко // Научно-технический вестник Поволжья. — 2019. — № 1. — С. 55–59.

8. Королев, А. В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / А. В. Королев, Ю. К. Новоселов. — Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1989. — 320 с.

9. Tamarkin, M. A. Optimization of Dynamic Surface Plastic Deformation in Machining / M. A. Tamarkin, E. E. Tishchenko, A. S. Shvedova // Russian Engineering Research. — 2018. — Vol. 38, no. 9. — P. 726–727.

10. Optimization of the flat stock cutting process by hydroabrasive jet / M. A. Tamarkin, V. I. Butenko, A. N. Isaev, E. V. Murugova // MATEC Web of Conferences. — 2018. — Vol. 226. — P. 232–235. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201822601025

11. Hamouda, K. Effect of the velocity of rotation in the process of vibration grinding on the surface state / K. Hamouda, H. Bournine, H. E. Amrou [et al.] // Materials Science. — 2016. — Vol. 52, no. 2. — P. 216–221.

Поступила в редакцию 01.06.2020
Запланирована в номер 31.08.2020

Об авторах:

Тамаркин Михаил Аркадьевич, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9558-8625, Scopus ID 6603762604, tehn_rostov@mail.ru

Тищенко Элина Эдуардовна, доцент кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5156-5544, Scopus ID 26640675300, lina_tishenko@mail.ru.

Верченко Алексей Викторович, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2898-039X, Alex290292@mail.ru.

Троицкий Виктор Михайлович, аспирант кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8545-8816, mihailovich2313@mail.ru.

Заявленный вклад соавторов:

М. А. Тамаркин — научное руководство, формирование целей и задач исследований, корректировка выводов. Э. Э. Тищенко — анализ результатов исследований, подготовка текста, формирование выводов. А. В. Верченко — формирование основной концепции исследований, проведение экспериментов. В. М. Троицкий — проведение экспериментов и расчетов, доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.